

Ralph Stelzer · Karl-Heinrich Grote · Klaus Brökel  
Frank Rieg · Jörg Feldhusen (Hrsg.)

# **ENTWERFEN ENTWICKELN ERLEBEN**

Methoden und Werkzeuge in der Produktentwicklung



**10. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik  
KT2012 | Residenzschloss Dresden | 14.–15. Juni 2012**



Stelzer · Grote · Brökel · Rieg · Feldhusen (Hrsg.)

**ENTWERFEN ENTWICKELN ERLEBEN**

Methoden und Werkzeuge in der Produktentwicklung

10. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik KT2012



Ralph Stelzer · Karl-Heinrich Grote · Klaus Brökel  
Frank Rieg · Jörg Feldhusen (Hrsg.)

# **ENTWERFEN ENTWICKELN ERLEBEN**

Methoden und Werkzeuge in der Produktentwicklung

Entwickeln – Entwerfen – Erleben.  
Methoden und Werkzeuge in der Produktentwicklung  
10. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik (KT2012)

Herausgeber:

Prof. Dr. Ralph Stelzer (Technische Universität Dresden)  
Prof. Dr. Karl-Heinrich Grote (Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg)  
Prof. Dr. Klaus Brökel (Universität Rostock)  
Prof. Dr. Frank Rieg (Universität Bayreuth)  
Prof. Dr. Jörg Feldhusen (RWTH Aachen)

Wir bedanken uns für die Unterstützung bei  
ma design, Tedata, Continental, xPLM, B.I.M. Consulting und Reiss Büromöbel

**ma design**  
//ENGINEERING

**Continental** 

**B.I.M.**  
consulting

**TEDATA**

**xPLM**  
Solution

**REISS**

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek  
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der  
Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind  
im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek  
The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche  
Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the  
Internet at <http://dnb.d-nb.de>.

ISBN 987-3-942710-80-0

© 2012 TUDpress  
Verlag der Wissenschaften GmbH  
Bergstr. 70 | D-01069 Dresden  
Tel.: 0351/47 96 97 20 | Fax: 0351/47 96 08 19  
<http://www.tudpress.de>

Alle Rechte vorbehalten. All rights reserved.  
Layout und Satz: Sandra Olbrich/Technische Universität Dresden.  
Umschlaggestaltung: TU Dresden, Illustration Audi A6 Limousine © 2012 Audi AG

Emanuel Richter, Axel Spickenheuer & Gert Heinrich

# **Entwicklungs- und Designmethoden für hochintegrale Leichtbauteile aus Faser-Kunststoff-Verbundmaterial**

## **Einleitung**

Faser-Kunststoff-Verbund (FKV)-Werkstoffe finden einen immer breiteren Einsatz in allen Bereichen der Industrie, wie zum Beispiel in der Luft- und Raumfahrt, im Automotive-Bereich, im Maschinenbau und bei Sportgeräten. Dabei entstehen besondere Herausforderungen für Entwickler, da Eigenschaften und Verfahren im Zusammenhang dieser Werkstoffe sich deutlich von denen der herkömmlich verwendeten Metalle oder unverstärkten Kunststoffe unterscheiden.

Technische Fasern werden in verschiedenen Verarbeitungsformen und in Kombination mit vielfältigen Matrixsystemen angewendet. Ein Großteil der Fasern wird heutzutage in Form von multiaxialen Geweben oder Gelegen verarbeitet. Bei diesen Halbzeugen sind die Fasern in mehreren Lagen unterschiedlicher Ausrichtung übereinandergelegt. Metalle können damit sehr einfach durch leichtere Faser-Kunststoffverbunde ersetzt werden. Diese Technologien versuchen weitestgehend isotrope Bauteileigenschaften aus den eigentlich anisotropen Materialeigenschaften zu erzielen. Dies reizt jedoch das Potential der Werkstoffe nicht aus.

Am Leibniz-Institut für Polymerforschung Dresden e. V. (IPF) werden Methoden entwickelt, um die Leistungsfähigkeit faserverstärkter Kunststoffe weiter zu steigern. Unter Verwendung der hier entwick-

kelten Tailored Fiber Placement (TFP)-Technologie (Gliesche et al. 1995 & Mattheij et al. 1998) können Fasern in der Ebene in beliebigen Orientierungen abgelegt werden. Dadurch können die vorteilhaften mechanischen Eigenschaften, wie hohe Festigkeit- und Steifigkeit, insbesondere von Carbonfaser-Verbunden wesentlich besser ausgenutzt werden. Zudem ergeben sich so für den Bauteilentwickler zahlreiche Freiheitsgrade bei der Gestaltung von FKV-Strukturen.

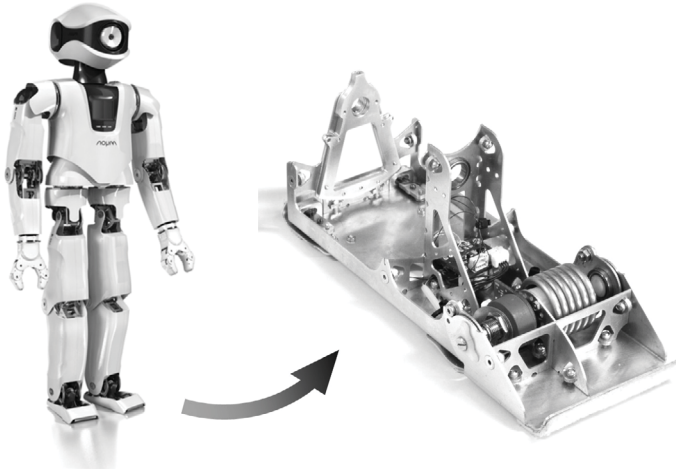
In diesem Beitrag werden verschiedene Methoden vorgestellt, die zur Bauteilauslegung und -gestaltung eingesetzt werden können um ein beanspruchungsgerechtes Design für Bauteile mit extrem hohem Leichtbaupotential zu finden. Als Anwendungsbeispiel dient hierzu der Fuß des humanoiden Roboters Myon. Seine Aluminiumstruktur wird durch einen beanspruchungsgerecht eingesetzten carbonfaserverstärkten Kunststoff (CFK) ersetzt. Zur Reduktion der Masse der Hauptplatte des Fußes werden Methoden der Topologie- und Materialoptimierung unter Einhaltung der Steifigkeitsanforderungen angewendet. Im Sinne des Systemleichtbaus und zur weiteren Reduktion der Strukturmasse wurden vorhandene konventionelle Maschinenelemente aus Metall beispielweise durch eine Blattfeder aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK) ersetzt bzw. ein neuartiges in den FKV integriertes Elastomergelenk entworfen.

### **Der ursprüngliche Roboterfuß des Myon**

Der Roboter Myon wurde als Plattform für Lernalgorithmen von der Arbeitsgruppe der Neurorobotik der Humboldt-Universität zu Berlin entwickelt. Der 15 kg schwere Roboter besitzt eine Größe von 1,25 m und ist in Abbildung 1 dargestellt.

Die Füße des Roboters (in Abbildung 1 rechts) bestehen im Wesentlichen aus einer Hauptplatte, die an das Knöchelgelenk angebunden ist, und einer Zehenplatte. Das Gelenk der Zehenplatte wird durch eine Schenkelfeder passiv zurückgestellt. An der Gelenkachse ist ein Potentiometer installiert, um den Anstellwinkel der Zehenplatte während der Bewegung des Roboters zu messen. Die Füße sind des Weiteren mit Kraftsensoren ausgestattet, um an der Fußsohle die Belastungen beim Auftreten zu messen.





*Abbildung 1: Darstellung des humanoiden Roboters Myon (links, Frackepohl Poulheim 2012) und des bestehenden Fußes in Aluminiumbauweise (rechts).*

Für das Redesign des Fußes wurden die Anschlussmaße des Knöchelgelenkes und die Dimensionen der bestehenden Hautplatte und Zehenplatte vorgegeben. Hieraus ergab sich der in Abbildung 2 dargestellte Designraum. Weitere Randbedingungen waren die Höchstbelastung auf die Fußsohle von 200 N und der maximale Anstellwinkel der Zehenplatte von ca. 70° bei dieser Kraft, der über einen Anschlag begrenzt wird.

Unter Beachtung der angestrebten Fertigungsverfahren (TFP und Vakuuminfusionsverfahren) und der notwendigen Schalengestalt ergibt sich ein erster Designentwurf, der in Abbildung 2 rechts dargestellt ist.

### **Optimierung der Hauptplatte**

Als größtes und zentrales Einzelteil des Fußes ist die Hauptplatte für Design und Struktur das entscheidende Element. Die Anwendung einer Strukturoptimierung mit dem Ziel der Massereduktion

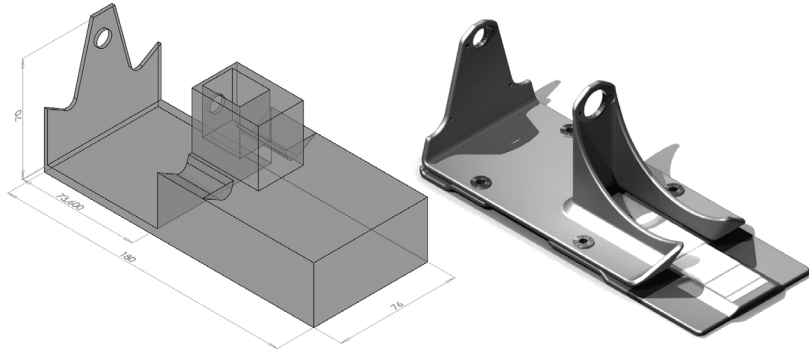


Abbildung 2: Für das Bauteil zur Verfügung stehende Designraum (links) und der erste Designentwurf (rechts)

ist durch das anteilig hohe Bauteilvolumen hier besonders sinnvoll. Durch die Kombination von Topologie- und Materialoptimierung konnte bereits das hohe Potential einer optimalen Materialausnutzung von FKV nachgewiesen werden (Spickenheuer et al. 2009a). Daher wurde ein entsprechendes Vorgehen auch im Falle der Hauptplatte durchgeführt.

Bei der Topologieoptimierung werden iterativ wenig beanspruchte Bereiche des Bauteilvolumens entfernt. Dabei kommen Analysemodelle auf Basis der Finiten Elemente Methode (FEM) in Verbindung mit optimalitäts- bzw. gradientenbasierten Optimierungsverfahren zur Anwendung. Als Ausgangsmodell dient ein fein vernetzter Designraum mit den entsprechenden Randbedingungen für Bauteilbelastung und Einspannung.

In Abbildung 3 sind das Ausgangsmodell (links) und der Designvorschlag (rechts) als direktes Ergebnis der Topologieoptimierung dargestellt. Aus diesem Designvorschlag wurde die spätere optimierte Struktur abgeleitet. Für einen Designvorschlag von hoher Qualität ist es wichtig, möglichst viel Designraum zur Optimierung zur Verfügung zu stellen. Das Design des Bauteils ist bei diesem Verfahren bestimmt durch die Gestaltung des Designvorschlages und durch die Optimierungsparameter. Der finale Optimierungsvorschlag,

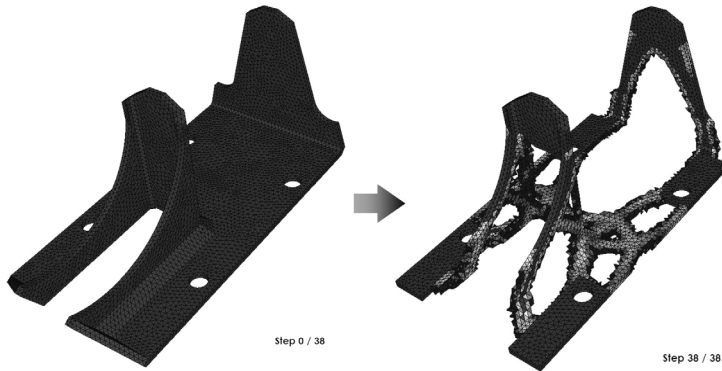


Abbildung 3: Topologieoptimierung der Hauptplatte; Designraum (links) und Designvorschlag der Optimierungsoftware (rechts)

welcher sowohl ästhetischen als auch mechanischen Ansprüche genügt, wird schließlich unter Beachtung der Prozessmöglichkeiten auf das ursprüngliche Modell übertragen.

Im Anschluss wird eine Materialoptimierung ausgeführt, bei der die Faserorientierungen den Lastverläufen im Bauteil angepasst werden. Mit dem am IPF entwickelten Softwaretool »AOPS« (Spickenheuer et al. 2008 & Spickenheuer et al. 2009b) werden dazu bei einem gegebenen Lastfall die anisotropen Materialeigenschaften entsprechend den berechneten Hauptspannungsvektoren ausgerichtet. Auf Basis des Hauptspannungsvektorfelds wird eine Linienintegration durchgeführt, welche Grundlage für die späteren Faserverläufe ist.

Diese Faserverläufe, die zu einer optimalen Bauteilsteifigkeit führen, sind oft nicht geradlinig und können daher am besten mit variabelaxialen Preformverfahren abgebildet werden, wie die am IPF entwickelte TFP-Technologie (Gliesche et al. 1995 & Mattheij et al. 1998). Dargestellt ist das Verfahren in Abbildung 4. Das Stickmuster für die optimierte Hauptplatte zeigt Abbildung 5. Mit der ebenfalls am IPF entwickelten Punchsoftware »EDOPunch« (Bittrich et al. 2012) können solche komplexen Linienmuster sehr schnell und effektiv für die Umsetzung mit der Stickmaschine aufbereitet werden.

## Feder und Gelenk

Die Edelstahl-Schenkelfeder des Zehengelenkes wird durch eine Blattfeder ersetzt. Durch den Einsatz von GFK wird eine erhebliche Massereduzierung erreicht – 5 g gegenüber 46 g der Edelstahl-Feder. Die Geometrie der neuen Blattfeder kann sehr frei gestaltet werden, da ausreichend Platz zur Verfügung steht. Eine möglichst lange und breite Feder bewirkt dabei die geringsten Materialbeanspruchungen. Mit Hilfe der FEM können die Federeigenschaften denen der bestehenden Edelstahl-Schenkelfeder angepasst werden.

Die Abwinklung der Zehenplatte ist im bestehenden Fuß über zwei Achsen mit Kugellagern umgesetzt. Bei der Umsetzung von Sohlen- und Zehenplatten aus gewebeverstärktem CFK kann die Anwinkelung durch ein Elastomergelenk umgesetzt werden. Hierzu wurde ein speziell modifiziertes Elastomer der Firma Kraiburg (Kraiburg 2012) verwendet. Die Funktionsfähigkeit dieser Technologie wird an dem in Abbildung 6 dargestellten Testbauteil demonstriert. Die Abbildung zeigt weiterhin den Fuß mit angewinkelter Zehenplatte, also gebogenem Gelenk und gedehnter Feder.

Durch die Umsetzung des Gelenkes mit einem Gummistreifen wird auf Achsen und Kugellager verzichtet und eine weitere Massereduzierung gegenüber dem Originalfuß erreicht.

## Ergebnisse

Bei dem Redesign des Fußes wurde im Wesentlichen die Geometrie des Originalfußes beibehalten. Diese reizt das Potential der verwendeten Technologien und Materialien nicht voll aus. Für ein problemlos umsetzbares noch weiter reichendes und materialgerechtes Design müsste aber nicht nur der Fuß, sondern die gesamte mechanische Struktur des Roboters neu entwickelt werden.

In Summe führen die verschiedenen angewendeten Methoden zu einer Bauteilmasse des neuentwickelten Fußes von 108 g. Dies entspricht etwa der Hälfte der Masse des ursprünglichen Aluminiumfußes (210 g) bei gleichbleibenden bzw. leicht verbesserten Steifigkeitseigenschaften.

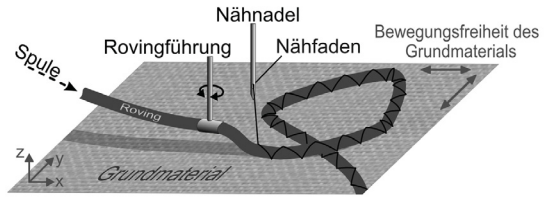
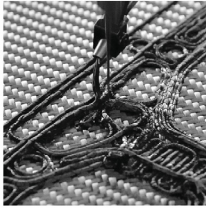


Abbildung 4: Fertigung der Preform mit der TFP-Technologie (links) und das allgemeine Funktionsschema (rechts)

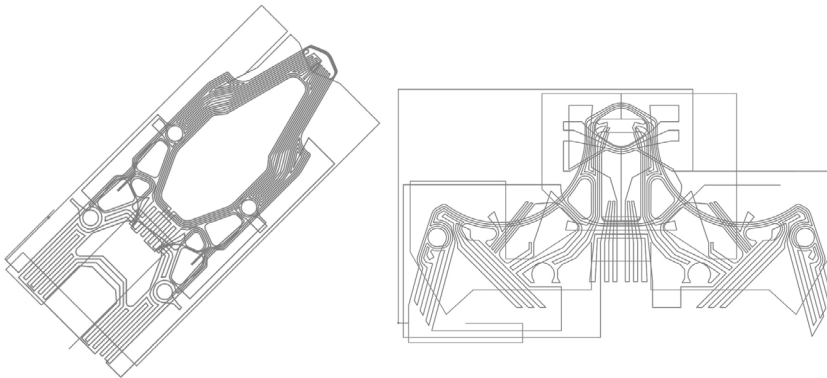


Abbildung 5: Aus den Hauptspannungsvektoren abgeleitetes, zweiteiliges Stickmuster

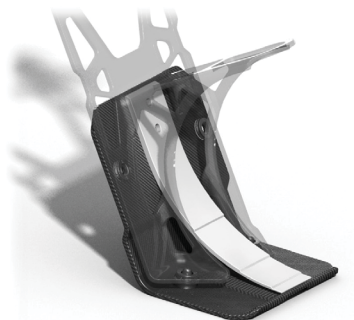


Abbildung 6: Testbauteil für das Zehngelenk (links) und CAD-Darstellung des angewinkelten Fußes (rechts)



Abbildung 7: Fertiger Fuß

Im Gegensatz zum Originalfuß ist der neue Fuß nicht in Differenzial-, sondern in Integralbauweise umgesetzt. Die Anzahl der Struktur-Einzelteile reduziert sich dadurch von über 20 auf vier. Dargestellt ist der gefertigte Fuß in Abbildung 7.

Ein weiterer positiver Effekt der offenen Struktur, die sich aus der Topologieoptimierung der Hauptplatte ergeben hat, ist ein verbessertes Handling des Fußes und eine Erleichterung der Anbringung von Elektronikkomponenten und Kabelführungen.

Weitere Elemente vom Materialmix des Fußes sind Edelstahlinserts in den CFK Bauteilen. Diese werden schon vor der Infiltration in die Preformen eingelegt und erhalten hierdurch einen Formschluss zum CFK-Material.

Die vorgestellten Methoden haben sich neben dem Roboterfuß auch bei anderen Demonstrationsbauteilen (Spickenheuer et al. 2009b & Spickenheuer et al. 2011) als günstig erwiesen und konnten mit messbarem Erfolg umgesetzt werden.

## Literaturverzeichnis

- Gliesche, K., Feltin, D. 1995: Beanspruchungsgerechte Textilkonstruktionen für Composite-Bauteile. In: Technische Textilien, 38, 209
- Mattheij, P., Gliesche, K., Feltin, D. 1998: Tailored Fibre Placement – Mechanical Properties and Applications. In: Reinforced Plastics and Composites, 17, 774–786
- Frackenhohl Poulheim 2012: Myon Roboter.  
[www.frackenhohl-poulheim.de/projekte/myon-roboter/](http://www.frackenhohl-poulheim.de/projekte/myon-roboter/), 18.04.2012
- Spickenheuer, A. ; Uhlig, K. ; Gliesche, K. ; Heinrich, G. ; Albers, A. ; Majic, N. 2009a: Steifigkeitsoptimierung von Faserverbundbauteilen für den extremen Leichtbau. In: 12. Chemnitzer Textiltechnik-Tagung, 210–219
- Spickenheuer, A., Schulz, M., Gliesche, K., Heinrich, G. 2008: Using tailored fibre placement technology for stress adapted design of composite structures. In: Plastics Rubber And Composites 37, 227–232
- Spickenheuer, A. ; Uhlig, K. ; Gliesche, K. ; Heinrich, G. 2009b: Experimental research on open-hole tensile specimens made of carbon fibre reinforced plastics (CFRP) with an optimised curvilinear fibre pattern. In: Güemes, A. (Hrsg): Proceedings of V International Conference on Science and Technology of Composite Materials (COMATCOMP 09), 1001–1004
- Bittrich, L., Spickenheuer, A., Uhlig, K., Heinrich, G. 2012: EDOPunch – ein neues Tool zur Effizienzsteigerung und Optimierung von Stickmustern und Faserverbundteilen. In: Tagungsband zur 13. Chemnitzer Textiltechnik Tagung, 181–185
- Gummiwerk KRAIBURG 2012: Rubberize your composites.  
[www.kraiburg-composites.com](http://www.kraiburg-composites.com), 18.04.2012
- Spickenheuer, A., Uhlig, K., Heinrich, G., Majic, N., Albers, A. 2011: Ansätze zur Strukturoptimierung für Faserverbundbauteile mit variabelaxialer Faserorientierung für den extremen Leichtbau . In: Wielage B. (Hrsg): Tagungsband zum 18. Symposium Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde, 579–584

## **Kontakt**

Dipl.-Ing. Emanuel Richter  
Dipl.-Ing. Axel Spickenheuer  
Leibniz-Institut für Polymerforschung Dresden e.V.  
Hohe Straße 6  
01069 Dresden  
[www.ipfdd.de](http://www.ipfdd.de)

Prof. Dr. rer. nat. habil. Gert Heinrich  
Technische Universität Dresden  
Institut für Werkstoffwissenschaft  
Helmholtzstraße 7  
01069 Dresden  
[www.tu-dresden.de/ifww](http://www.tu-dresden.de/ifww)